

数字音频功率放大器——传承模拟，创新科技

1、引言

21 世纪是数字化的年代，数字音响是追求“原汁原味”音响效果的最有效手段。扩声音响系统的数字化发展极为迅速，声源（CD、DVD、MD、MP3 和 DAT……等）都已实现了数字化，并且继续向更新、更高的技术迈进。数字调音台已不再是专业录音的专用品，以 Panasonic/RAMSA 奥运现场应用为代表的调音台已开始进入国际现场扩声工程。音频信号处理设备的数字化进程发展得很快，各种可编程得数字音频处理器已大量进入市场，任你选用。扩声工程系统已进入数字网络传输年代。

但是，音频功率放大器至今仍以模拟功放为主，这种模拟功放技术已经发展到了极限，很难再有突破性进展，已无法满足现已进入数字音频网络扩声系统时代的要求了。数字音频功率放大器（DPA/Digital Power Amplifier）以其特有的许多优越特性取代模拟功放是发展的必然趋势。

模拟类功放是以线性放大为基础，功率放大器件有电子管和晶体管两类。按功放静态工作点的设置可分为 A 类放大，A/B 类放大和 C 类放大三种。A 类放大的失真最小，音质好，但电源的转换效率最低，器件的发热量大，生产成本高，一般用于输出功率较小的 Hi-Fi 发烧级功放。C 类放大的失真比 A 类大些，尤其是在小信号放大时（1/100 输出功率）音质失真较明显，但转换效率高，器件发热量少，性能/价格比高，一般用于输出功率大的专业功放。A/B 类功放的特点介于 A 类和 C 类之间，多用于家庭影院的 AV 功放。

电子管功放已有数十年历史，一直沿用至今，是功放的元老代。由于它的转换速率高（影响高音品质的参数）、工作可靠、偶次谐波失真小（听觉对偶次谐波失真特别敏感）、音质好等因素，一直被人们宠爱，但它的最大缺点是电源利用率极低，电子管 A 类放大的效率不到 10%，C 类约为 15～17%，大部分电能变为热量耗散掉。由于耗电大、发热高、体积和重量大、耗材多、成本高等缺点，在专业音响系统中已被晶体管功放所替代。

晶体管功放是近 30 多年发展起来的新秀，是音频功率放大器的第二代产品。它的最大优点是电源转换功率高（C 类功放最大可达 55%）、体积小、重量轻、发热量不大、生产成本低。缺点是转换速率低、偶次谐波失真较大、音质和可靠性指标都略逊于电子管功放。随着晶体管制造技术的不断提高和新技术的应用，各项实用性指标和可靠性指标都已得到了很好解决。并不断在向更大的输出功率、更小的体积、更轻的重量、更多的功能和智能化方向发展，如美国 CROWN 公司的 MA-5000VZA 功放，他的最大输出功率可达 4000W/8Ω（桥接，单通道）；完善的可靠性设计使它在苛刻的环境中可连续工作及三年免维护保证；插入可编程的输入处理模块 USP3，可对 1－2000 台功放的工作状态进行遥控调节和检测各种参数。各种完善的可靠性保护措施，使它的可靠性大大提高，可与电子管功放媲美。

晶体管功放具有许多宝贵优点，它的失真指标可做到万分之一以上，但其音质听感总不如电子

管功放那么逼真、细腻，尤其是在表现瞬态变化快而清脆的打击乐和浑厚回荡的钢琴曲方面感觉最明显。上个世纪 80 年代初，欧洲有些专业公司开始研究晶体管功放与电子管功放之间的性能差异和解决办法。电子管是一种电压控制器件，需要的控制功率极微，开关速率很快。晶体管是一种电流控制器件，需有较大的控制电流，转换速率较慢。这是最基本的差别。80 年代中期欧洲首先推出了采用 MOS FET 音频场效应管功放。MOS FET 场效应晶体管既具有晶体管的基本优点，又有电子管的电压控制及转换速率较快的优点。但使用不久发现这种功放的可靠性不高（无法外电路保护），开关速度提高的不多和最大输出功率仅为 150W/8Ω等等。90 年代初，MOS FET 的制造技术有了很大突破，出现了一种高速 MOS FET 大功率开关场效应晶体管。西班牙艺格公司（ECLER）经多年研究，攻克了非破坏性保护系统的 SPM 专利技术，推出了集电子管功放和晶体管功放两者优点结合的第三代功放产品，在欧洲市场上获得了认可，并逐步在世界上得到了应用。第三代 MOS FET 功放的中频和高频音质接近电子管功放，但低频的柔和度比晶体管功放差一些，此外 MOS FET 开关场效应管容易被输出和输入过载损坏。

早在上个世纪 60 年代就有人提出了数字功放的概念，由于当时技术条件的限制，进展一直较慢。1983 年，M.B.Sandler 等学者提出了 D 类放大的 PCM（脉冲编码调制）数字功放的基本结构。主要技术要点是如何把 PCM 信号变成 PWM（脉冲调宽信号）。美国 Tripass 公司设计了改进的 D 类数字功放，取名为“T”类功放。1999 年意大利 POWERSOFT 公司推出了数字功放的商业产品，从此，第四代音频功率放大器－数字功放进入了工程应用，并获得了世界同行的认可，市场日益扩大，最终必将替代各类模拟功放。

2、 数字音频功率放大器的工作原理

（1） D 类数字音频功率放大器

D 类数字音频功率放大器与上述各类模拟功放的最大区别是不以线性放大音频信号为基础，而是以放大数字信号为原理的一种数字信号放大技术。

D 类数字功放首先把模拟音频信号变换为图 1 所示的脉冲宽度调制（PWM）信号。在 PWM 专换中，以 44.1KH$_2$ 或 48 KH$_2$ 的取样频率和 8bit 或 16bit 的量化率（即模拟信号振幅值的读出刻度）进行 A/D（模拟/数字）变换。然后再把 PWM 数字信号进行高效率放大（D 类放大）。由于音频信号的信息全部包含在脉冲的宽度变化中，与脉冲的幅度变化无关，因此，只要采用截止频率为 30 KH$_z$～40 KH$_2$ 的低通虑波器就可把模拟音频信号解调出来。图 2 是 D 类数字功放的原理图。为适应 CD 光碟等数字声源直接输出的脉冲编码调制（PCM）数字信号输入，数字功放内设有一个 PCM 转换为 PWM 的调制转换装置。

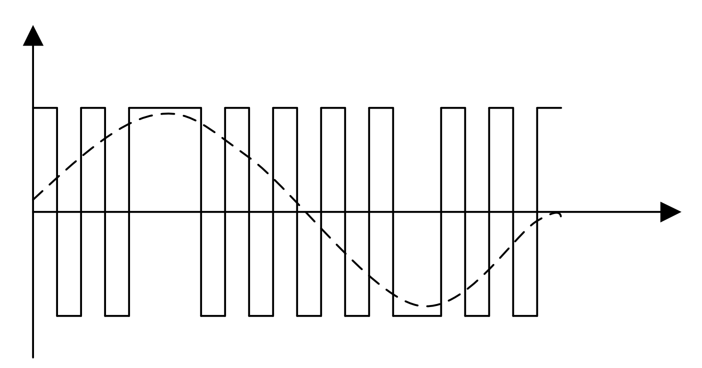


图 1 脉冲调宽波形（PWM）

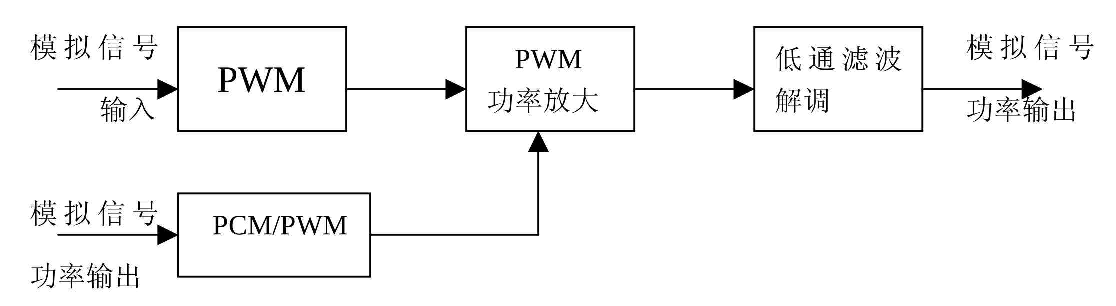


图 2　D 类数字功放原理图

D 类数字功放的电源利用率可达 80％以上；它的延时（相移）约为模拟功放的 1/6。但是解调出来的音频信号过零失真（即交越失真）较大。美国 Tripass 推出的改进过零失真的 D 类数字功放（取名为“T”类数字功放），采取了对输入模拟信号用自适应算法的脉冲调宽技术，使输出的失真大大减少。

（2）　1bit 数字功率放大器

在 PWM 数字编码中，度量模拟信号的变化范围由量化 bit 数决定。每 1bit 的量化值相当于 6db 的信号变化范围。例如：采用 16bit 量化的 A/D 变换，可获得 16×6＝96db 的信号动态变化值。实际可获得的频率范围约为 1/2 取样频率，因此 44.1 KH_2 的取样频率可获得的频率响应特征范围为 20 H_z~20 KH_z。

1bit 数字功放是 1999 年日本 SHARP 公司另辟新路提出的数字功放方案。1bit 数字功放采用 2.8244MH_2 高取样率和 1bit 量化的数字编码方案。1bit 量化对模拟信号振幅变化的度量是根据信号变化前后两个取样值来判决的。如果模拟信号的幅值比前面取样的幅值增大，则输出数字信号为“1”（输出一个脉冲），反之，如果后面取样信号的幅值小于前面取样信号的幅值小，则输出的数字信号为“0”（没有脉冲输出）。这样形成的数字信号流是由“0”和“1”组成的等宽度脉冲序列（即 PCM 脉冲编码）。由此可见，1bit 信号所测量的是模拟信号振幅变化的相对差值，称为△－Σ增量调制编码法，如图 3 所示。

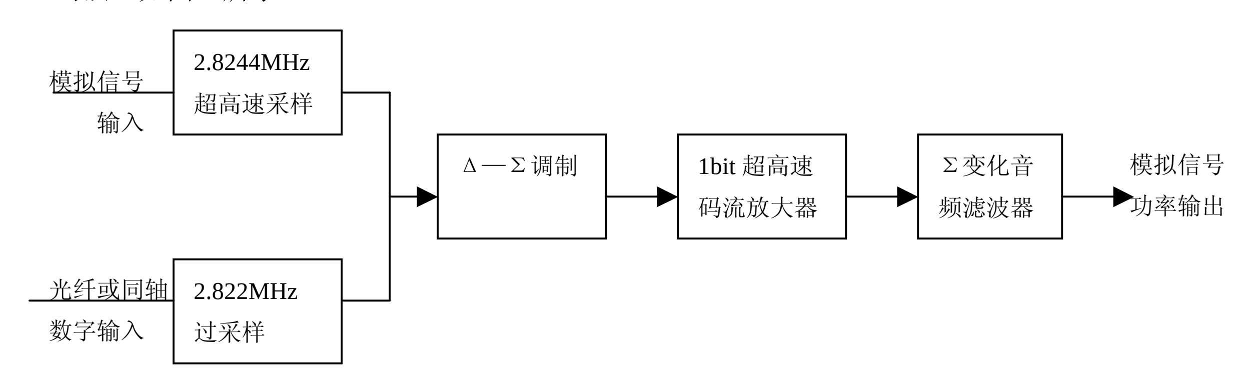


图 3　1bit 数字功率放大器原理

1bit 数字功放与 D 类和 T 类数字功放相比具有很多优点，完全克服了过零失真问题，电源转换效率可达到 90％以上，频率响应特性可达到 2H_z～50KH_z，信号动态范围可达到 95db 以上，其它的优点包括音频范围内的噪声极微和频率范围内的相移极小等等。它的最大缺点是系统复杂，成本太高，尚未达到应用阶段。而近年来 D 类和 T 类数字功放的价格已逐步降到用户可接受的商业价格了。

3、 数字功率放大器的应用

数字功放有许多优秀性能，主要表现在：

1)　转换速率高，瞬态响应特性好，中音和高音清晰、明亮、层次感好。
2)　信号动态范围大，可达到 95db 以上。
3)　全频段内的相移极小，不会产生声音染色。

4)　不需任何附加装置可方便地实现遥控、群控和监测等功能。
5)　电源转换效率可高达 80～95％以上，机内温升极低，散热简单。
6)　可连接的最低负载阻抗达 1 欧姆，并且无论负载阻抗高低而电源转换效率保持不变。
7)　可适应各种网络音响传输系统。
8)　可靠性极高。
9)　体积小，重量轻。**12000W÷9.5kg＝1263.15W/1kg**

数字功放的缺点目前还没有什么集中的反映，有少数用户反映对于少数具有特别丰富超低音信号的乐器（如管风琴、低音大提琴等）声音表达的不够丰满柔和，其原因是瞬间大电流供应不足，解决办法是在驱动超低音箱时采用 3：1 以上的功率配比，实行“大马拉小车”的方法。一般全频扬声器箱可按普通的功率配比驱动。

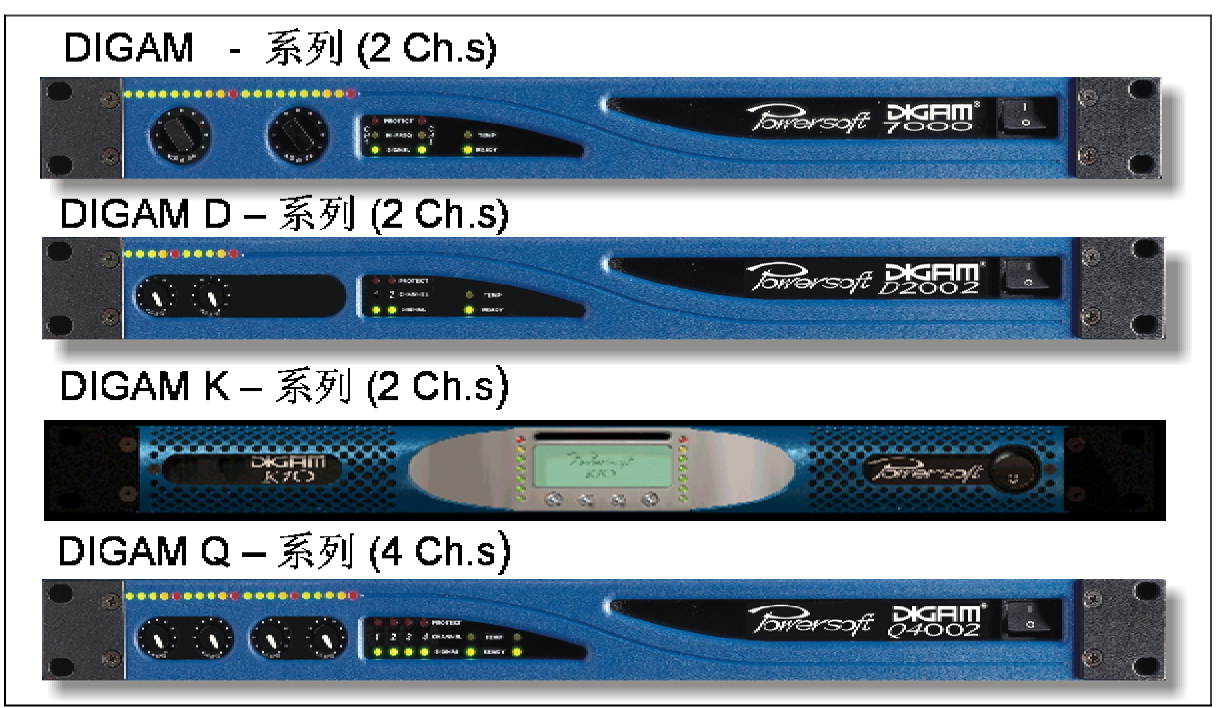


表 1 是数字功放与模拟功放的主要技术 特性对比。

目前小功率数字功放已广泛用于 DVD 内置功放、组合音响、汽车音响、家庭影院等，在专业音响工程方面，2001 意大利 POWERSOFT 公司推出的 DIGAM 系列大功率专业数字功放已被世界广泛采用，且很快进入中国市场，在一些专业音响工程中获得了应用，并得到了一致的好评。

POWERSOFT　数字功放有 Q 系列和 D 系列和 DIGAM 三个系列产品，主要性能如下：

- 频率响应（1W,8Ω）：**5H_2～30KH_2**
- 阻尼系数（10H_2～400H_2）>600
- 转换速率（8Ω负载）：**40V/US**
- 信号/噪声（**20H_2～20KH_2**）：≥**105db**（**A**）
- 总谐波失真（**0.1W**～满负荷）：**< 0.1**％
- 互调失真（**0.1W**～满负荷）：**< 0.02**％
- 自适应电源电压范围：**95V**～**265V**，**50H_2/60H_2**
- 工作温度：**0**℃～**45**℃
- 重量：**D** 系列 **9.5Kg**，**Q** 系列 **8.5Kg**
- 体积（宽×高×深）：**485**×**55**×**455mm**
- 功率输出特性：见表 **2** 表 **3**

表 1　数字功放与模拟功放主要技术特性对比

特性名称	模拟类功放	数字功放
信号瞬态响应特性（涉及中、高频音质和清晰度）	转换速率（Slew）＝10V/US~18V/RS	转换速率（Slew）＝40V/US~70V/US
阻尼系数 D（涉及低音的清晰度和纯度）	D=100~1000(10~400H_2)	D≥600(10~400H_2)
信号动态范围（涉及声音的细腻度和层次感）	≤80db	≥95db
全频段内的相移（涉及声像定位和声音染色）	5°～ 10°（取决于功放采用的负反馈深度）	无相移（功放内不采用负反馈电路）
功放遥控，群控和参数监测功能	必须采用专用的 DSP 数字控制配件（选购件）	机内可直接控制和编程
电源利用率（效率） η	η＝45％～55％，负载越低，效率越低，发热量越大，温升越高	η≥90％，效率不随负载阻抗变化，发热量小，温升低，省能源
与数字声源和数字设备的配接	需经由 A/D 变换才能配接	可直接配接
可连接的最低负载阻抗	2Ω	1Ω
最大输出功率	单通道桥接：5000W/4Ω	单通道直接输出：12000W/2Ω
对供电电压的适应性	110V±10％或 220V±10％人工切换	100V～250V 范围内自动适应不须切换
信号长距离的传输特性	模拟信号长距离传输失真增大，高频特性跌落和信号/噪声比下降	数字信号长距离传输不会引起增大失真，高频特性跌落和信号/噪声比不下降
机内温升	发热量大，温升高，必须采用强制风冷散热	发热量小，温升低，散热简单
可靠性	机内温升每提高 10℃，半导体器件的失效率增加一倍	机内温升低，可靠性系数明显提高
体积和重量	体积大，重量重	体积小，重量轻（约为模拟功放的 1/3～1/4）

表 2　POWERSOFT　D 系列 及 DIGAM 系列 二通道数字功放的输出特性

	双通道立体声输出（RMS） W				单通道输出（桥接）		
负载阻抗	1Ω	2Ω	4Ω	8Ω	2Ω	4Ω	8Ω
D1502	——	2×750	2×400	2×250		1500	800
D1604	——		2×800	2×500			1600
D2002	——	2×1000	2×600	2×350		2000	1200

D2004	——		2×1000	2×600			2000
D3002	——	2×1500	2×830	2×500		3000	1660
D4002	——	2×2000	2×1100	2×650		4000	2200
DIGAM3000	——	2×1500	2×820	2×450	——	——	——
DIGAM5000	——	2×2500	2×1360	2×750	——	——	——
DIGAM7000	——	2×3500	2×1910	2×1050	——	——	——
New！**DIGAMK6**	——	2×3600	2×2500	2×1300	7200	**5000**	**2600**
New！**DIGAMK8**	——	2×4800	2×3000	2×1500	9600	**6000**	**3000**
New！**DIGAMK10**	——	2×6000	2×4000	2×2000	12000	**8000**	**40000**

测试环境：2 通道工作（1KHz，0.1%THD）*EIAJ 测试

表 3　POWERSOFT　Q 系列　四通道数字功放的输出特性

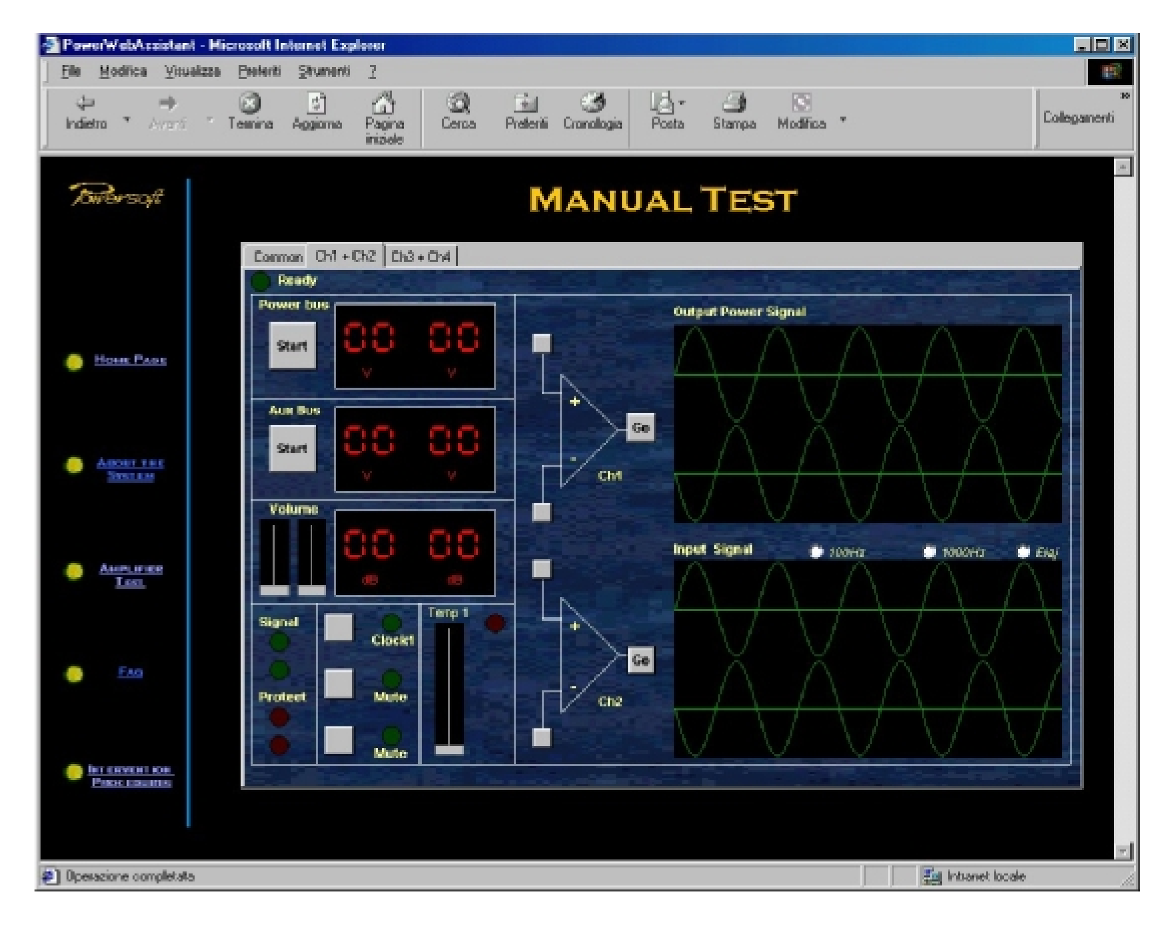
	四通道输出（RMS）　W				双通道输出（桥接）		
负载阻抗	1Ω	2Ω	4Ω	8Ω	2Ω	4Ω	8Ω
Q3002	——	4×750	4×400	4×250	——	1500	800
Q3204	——	——	4×800	4×500	——	——	1600
Q4002	——	4×1000	4×600	4×350	——	2000	1200
Q4004	——	——	4×1000	4×600	——	——	2000
Q5001	4×1250	4×700	4×350	4×180	2500	1400	700

测试环境：4 通道工作（1KHz，0.5%THD）*EIAJ 测试

PowerSoft 数字功放机组现场的系统工作范例：

一、功放机组系统管理及通道模拟分配的设计系统





二、系统工作状态的监控系统